

基于路段元胞传输模型的动态用户最优配流问题

连爱萍¹ 高自友¹ 龙建成¹

摘要 利用基于路段的元胞传输模型进行模拟,给出了一种计算实际路段出行阻抗的方法,并在此基础上构造了基于路段变量的动态用户最优变分不等式模型.模型采用针对迄节点的路段变量,在每一个小时段都能给出路段流入率、流出率、路段流量和实际路段阻抗,为用户提供较为全面的诱导信息打下了较好的理论基础.采用了修正投影算法来进行求解.数值算例表明模型具有的实用性和优越性,使道路交通流宏观模型与动态网络交通配流问题得到较好的结合.

关键词 路段实际阻抗,变分不等式,元胞传输模型,动态用户最优配流
中图分类号 U491.1+12

A Dynamic User Optimal Assignment Problem of Link Variables Based on the Cell Transmission Model

LIAN Ai-Ping¹ GAO Zi-You¹ LONG Jian-Cheng¹

Abstract This paper develops a method for estimating the link travel time by using the cell transmission model (CTM) and formulates a variational inequality problem of dynamic user optimal (DUO) based on the link variables. In our DUO formulation, the variables are towards the destinations, which, at each interval, can provide the link inflow rates, the link outflow rates, the link flows and actual travel times, consequently providing complete inducing information for travelers. To get the solutions, we employ a modified projection method for the problem based on link variables. Our DUO formulation is a good combination of the road traffic flow model and the network traffic assignment problem. Its practicability and advantages are confirmed by numerical simulation.

Key words Actual link travel time, variational inequality, cell transmission model, dynamic user optimal assignment

1 引言

动态交通分配 (DTA) 理论是 ITS 项目中最重要理论基础之一,目前在国际上受到了空前的重视,得到各国学者的广泛研究.在 DTA 研究领域中,路径(段)出行阻抗函数的实际描述准确性不高限制了动态交通分配理论与相关应用研究的进展,它的不先进性迫切需要更加符合实际的路径(段)阻抗函数以及动态交通理论模型.于是,一些研究学者尝试将道路交通流与网络交通流模型进行结合^[1~3].道路交通流模型力图描述实际交通中道路上的一般微观特性,能够模拟实际的交通过程;而网络交通流模型则为针对由多条道路构成的城市网络上的交通流形成机理进行的研究,其中涉及到了人的路径选择行为.如果将两类模型相结合,不但可以保证真实地

反映路段交通流动态特性,而且在考虑实际拥挤排队物理长度的基础上计算阻抗,克服了传统方法排队质点化的缺陷,使动态网络交通流分配模型向动态化、密度化方向发展.

CTM 模型^[3,4]是利用有限差分为宏观道路交通流模型 LWR 模型^[5,6]设计的一种新的近似方法,它模拟的车流能够向行驶,能清楚地描述排队的物理效应以及一些交通流动力学特性,如:激波、排队形成、排队消散以及多路段间动态的相互影响.在 Lo 和 Szeto^[1]基于该模型计算路径阻抗时,都是针对整个网络各条路径进行的系统模拟,但其最初是针对单条路段设计的,并且为了保证先进先出 (FIFO) 条件的成立,还要追踪车辆在元胞上的等待时间,进行反函数等过程计算,从而使模拟过程较为复杂.另外,他们的模型采用了基于路径的变量,只能给出确定的起讫点 (OD) 的路径信息,在满足出行者信息需求上也存在着不足.

本文采用原始的 CTM 模型只针对单条路段上交通流的动态演进进行模拟,并采用一种比 Lo 和 Szeto^[1]模型更为简便易行的平均方法,在保证 FIFO 的同时计算路段实际阻抗,避免了求解反函数、积分等复杂的计算过程.并且,此处将路段的 CTM 模型作为流量演进方程放到网络配流模型中,可以减少路段流量及流出率变量,减化了模型求解.

收稿日期 2005-11-10 收修改稿日期 2006-5-11
Received November 10, 2005; in revised form May 11, 2006
国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(2006CB705500), 国家杰出青年科学基金 (70225005), 国家自然科学基金 (70471088) 资助
Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2006CB705500), National Outstanding Young Investigation Grant of Natural Science Foundation of China (70225005), National Natural Science Foundation of China (70471088)
1. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室 北京 100044
1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044
DOI: 10.1360/aas-007-0852

另外, 为了更加满足出行者的出行需求, 提供较全面的路段信息, 使用更加符合现实中人们的择路行为的针对迄节点的路段变量; 通过求解模型可提供每一个小时段的各条路段上的流入率、流出率、路段流量及路段实时阻抗等结果, 为先进的交通诱导系统 (ATIS) 提供完备的诱导信息. 求解时采用修正的投影算法, 无需导数信息, 对阻抗函数特性要求较低, 方便求解. 算例表明, 模型不但保持了 CTM 模型可以模拟一些复杂而丰富的交通动力学特征的特点, 而且在先进先出 (FIFO) 条件下遵循理想的 DUO 条件, 使道路交通流模型与网络交通流得到较好的结合.

2 符号定义

在一个多起点多迄点的强连通的交通网络中, 定义 N 为网络节点的集合; r 为起节点, s 为迄节点; $a = (l, m)$ 为节点 l 到 m 的路段; A 为网络有向弧 (路段) 的集合; A_l 为进入节点 l 的路段的集合; B_l 为离开节点 l 的路段的集合. 对 $\forall t \in [0, T]$, 引入如下变量:

$u_a(t)$: t 时刻进入路段 a 的流入率, $u_a^s(t)$ 为 t 时刻进入路段 a 的要到迄点 s 去的流入率;

$\mathbf{u}(t)$: $u_a(t)$, $\forall a$ 构成的 n_1 维向量;

\mathbf{u} : $\mathbf{u}(t)$, $\forall t$ 构成的向量;

$U_a(t)$: t 时刻进入路段 a 的累积流入量;

$V_a(t)$: t 时刻进入路段 a 的累积流出量;

$v_a(t)$: t 时刻离开路段 a 的流出率, $v_a^s(t)$ 为 t 时刻离开路段 a 的要到迄点 s 去的流出率;

$x_a(t)$: t 时刻路段 a 上的流量; $x_a^s(t)$ 为 t 时刻路段 a 的要到迄点 s 去的流量;

$g_l^s(t)$: t 时刻在节点 l 产生的要到迄点 s 去的流量速率 (已知);

$\tau_a(t)$: t 时刻进入路段 a 的车辆的实际出行阻抗;

$\Omega_q(t)$: t 时刻路径 q 上的实际出行阻抗;

$\pi_l^s(t)$: t 时刻从节点 l 出发到迄点 s 的最小实际出行阻抗.

3 基于 CTM 模型的实际路段阻抗的计算

3.1 交通流在路段上的传播

CTM 模型^[4,7] 是针对交通流连续方程 LWR 提供的一种数值近似方法, 具体方法为: 考虑一般的多起点多迄点的交通网络, 将路段划分为多个等距的小段 (元胞). 研究的时段 $[0, T]$ 被划分为 K 个时段, 使用两种时间指标, 第一种为 $k = 1, \dots, K$, 描述车流在每条路段起点的出发时间; 第二种为 $\omega = 1, \dots, N$, 描述已在路网上行驶的时变的交通

流的运动. 假设研究时段足够长, 所有的车流在该时间段内驶出路网.

那么 LWR 方程近似离散化为

$$n_j(\omega + 1) = n_j(\omega) + y_j(\omega) - y_{j+1}(\omega) \quad (1)$$

$$y_j(\omega) = \min\{n_{j-1}(\omega), Q_j(\omega), (W/V)[N_j(\omega) - n_j(\omega)]\} \quad (2)$$

其中, 下标 j 代表元胞 j , $j+1(j-1)$ 代表 j 的下游 (上游) 的元胞. 变量 $n_j(\omega)$, $y_j(\omega)$, $N_j(\omega)$, $Q_j(\omega)$, W , V 分别为时刻 ω 元胞 j 上的车辆数, 实际流入率和能够承载的最大车辆数 (承载能力), 流入能力, 自由流速和后向激波速 (拥挤后向传播速度). 式 (1) 和 (2) 给出了交通流随时间演变的更新方法.

针对单条路段, 本文在路段的起点元胞 r 前以及终元胞 d 后均添加一个虚拟元胞, 它们类似于一个巨大的车库, 能够承载无限大的即将进入和流出的路段流量, 分别记作元胞 $r-1$ 和 $d+1$. 通过下式将流入率 $u_a(k)$ 加载到虚拟上游元胞上来实现路段流量加载

$$y_{r-1,a}(\omega) = u_a(k) \quad (3)$$

$$n_{r-1,a}(\omega+1) = n_{r-1,a}(\omega) + y_{r-1,a}(\omega) - y_{r,a}(\omega) \quad (4)$$

其中 $y_{r,a}^s$ 受 r 处的拥挤和流量的限制. 当流量被加载到路段上后, 条件 (1)、(2) 保证了交通流在路段上的传播. 另外, 元胞的划分需要在准确地描述实际情况的同时兼顾具有更快的计算效率, 因此在离散化时要求使用较小的时间步长以及划分较多的元胞. 一般的, 划分的元胞长度 Δx 和时段 Δt 要求满足条件 $\Delta x \geq \Delta t \cdot v_f$, 其中 v_f 为自由流速度. 本文模型使用元胞长度 $\Delta x = \Delta t \cdot v_f$.

3.2 交通流在网络上的传播

上述模型只描述了交通流在单条路段上的传播, 那么扩展到网络的情形, 考虑到路段能力限制, 路段上终点虚拟元胞的流入率 $y_{d+1,a}(\omega)$ 即该路段的流出率, 需要根据路段 a 结尾处与其它路段相连接的具体情形来确定. 主要考虑以下三种情形, 其它情形可进行相应转化^[7].

令 $S_{j,i}(k) = \min\{Q_{j,i}(k), n_{j,i}(k)\}$, $R_{j,i}(k) = \min\{Q_{j,i}(k), \delta[N_{j,i}(k) - n_{j,i}(k)]\}$, 其中, j, i 分别代表元胞位置和路段, $\delta = W/V$.

1) 单路段相接 (如图 1 所示): $y_{d+1,a}(\omega) = \min\{S_{d,a}(\omega), R_{r,b}(\omega)\}$.

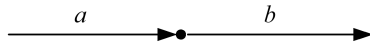


图 1 单路段相接

Fig.1 Ordinary links

2) 路段会聚 (如图 2 所示).

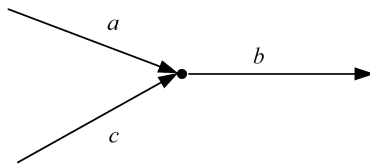


图 2 路段会聚

Fig.2 Merges links

如果 $R_{r,b}(\omega) < S_{d,a}(\omega) + S_{d,c}(\omega)$, $y_{d+1,a}(\omega) = \min\{S_{d,a}(\omega), R_{r,b}(\omega) - S_{d,c}(\omega), p_a(\omega)R_{r,b}(\omega)\}$ 和 $y_{d+1,c}(\omega) = \min\{S_{d,c}(\omega), R_{r,b}(\omega) - S_{d,a}(\omega), p_c(\omega)R_{r,b}(\omega)\}$, 其中 $p_a(\omega) + p_c(\omega) = 1$, $p_a(\omega)$ 和 $p_c(\omega)$ 可以根据 k 时刻进入路段上的流入率 $u_a(k)$ 和 $u_c(k)$ 比例确定.

如果 $R_{r,b}(\omega) \geq S_{d,a}(\omega) + S_{d,c}(\omega)$, $y_{d+1,a}(\omega) = S_{d,a}(\omega)$ 和 $y_{d+1,c}(\omega) = S_{d,c}(\omega)$.

3) 路段发散 (如图 3 所示).

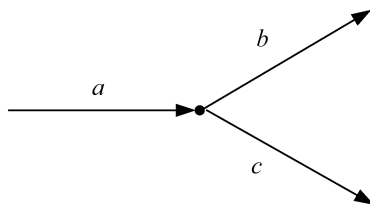


图 3 路段发散

Fig.3 Diverge links

此时, $y_{d+1,a}(\omega) = \min\{S_{d,a}(\omega), R_{r,b}(\omega)/\beta_b(\omega), R_{r,c}(\omega)/\beta_c(\omega)\}$, 其中 $\beta_b(\omega) + \beta_c(\omega) = 1$, $\beta_b(\omega)$ 和 $\beta_c(\omega)$ 可以根据此时终点元胞 a 上的去往 b 和 c 方向的流量比例确定.

处理信号网络以及突发事件或者路段堵塞等情

况时, 需要调整受控元胞 (如交通信号灯影响范围内的元胞、事故点上的元胞等) 的流量能力 $Q_j(\omega)$. 例如对于受信号灯控制的情况, 在受控的元胞上, 流入能力分别为:

$Q_j(\omega) = s_f$, ω 在绿灯相位上, 且 j 是一个有信号灯控制的元胞.

$Q_j(\omega) = 0$, ω 在红灯相位上, 且 j 是一个有信号灯控制的元胞.

这里 s_f 是饱和流入量. 对于交通事故的处理也可以采用类似的方法.

综上, 可以得到任意时段 ω 路网中路段 a 上元胞 j 的车辆数的 $n_{j,a}(\omega)$ 和 $y_{d+1,a}(\omega)$, 从而计算路段的车辆数和流出率. 针对去往不同迄点的路段流出率我们采用去往不同迄点的流入率占总流入率的比例获得.

3.3 实际路段阻抗的计算

基于上述, 构造如下网络条件下实际路段阻抗的计算方法. 由于受到路段入口流入能力的限制, k 时刻路段出行需求 $u_a(k)$ 将会分成 m 个子流量分别在 $k+1, k+2, \dots, k+m$ 时段流出该路段, 设 $k+n$ 时段对应的子流量为 a_n , $1 \leq n \leq m$, $a_n \geq 0$ 和 $\sum_{k=1}^m a_n = u_a(k)$. 首先给出如下满足 FIFO 条件的子流量计算方法.

对于大于 k 的某时段 n 如式 (5) 所示.

具体关系详细参见图 4.

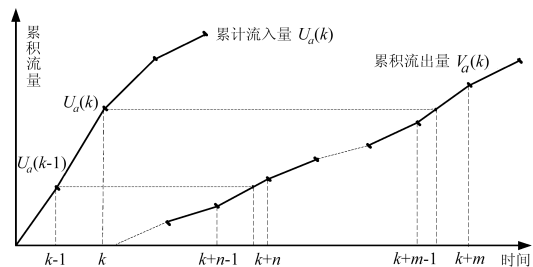


图 4 路段起点和终点的累积流入量和累积流出量关系图

Fig.4 The cumulative vehicle counts in origin cell and destination of link

$$a_n = \begin{cases} 0 & \text{若 } V_a(k+n) < U_a(k-1) \\ V_a(k+n) - U_a(k-1) & \text{若 } V_a(k+n-1) < U_a(k-1) \leq V_a(k+n) \leq U_a(k) \\ y_{d,a}(k+n) \cdot 1 & \text{若 } U_a(k-1) \leq V_a(k+n-1) \leq V_a(k+n) \leq U_a(k) \\ U_a(k) - V_a(k+n-1) & \text{若 } U_a(k-1) \leq V_a(k+n-1) \leq U_a(k) < V_a(k+n) \\ 0 & \text{若 } U_a(k) < V_a(k+n-1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau_a(k) = \frac{a_1 \cdot (k+1-k) + a_2 \cdot (k+2-k) + \dots + a_m \cdot (k+m-k)}{a_1 + a_2 + \dots + a_m} = \frac{a_1 + 2a_2 + \dots + ma_m}{u_a(k)} \quad (6)$$

于是，我们给出计算路段实际平均出行阻抗的方法如式 (6) 所示。

式 (6) 对行驶快慢不同的子流量的走行时间取了平均，所以在时间离散化及元胞划分较为精细的条件下，采用 CTM 模型作为流量演进方程自身可确保流量按照 FIFO 条件进行传播。

4 基于路段 CTM 模型的动态用户最优的变分不等式问题

基于实际路段阻抗的变分不等式问题^[8,9]的叙述，基于 CTM 模型的路段变量的动态用户最优的变分不等式模型如下

$$\text{VIP } \sum_s \sum_a \Omega_a^{s*}(k)[u_a^s(k) - u_a^{s*}(k)] \geq 0, \forall a, \forall s, \forall k \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{a \in B_l} u_a^s(k) = \sum_{a \in A_l} v_a^s(k) + g_l^s(k), \forall l \neq s, \forall s, \forall k \quad (8)$$

$$u_a^s(k) \geq 0, \quad \forall a \in B_l, \forall s, \forall k \quad (9)$$

因为引入的 CTM 模型本身即为一个满足 FIFO 的流量传播方程，所以约束集中只含有非负约束以及需求流量守恒约束。此外，利用 k 时段之前 CTM 模型计算的元胞车辆数和终点虚拟元胞的流入率，可以得到 $x_a(k)$ 和 $\sum_{a \in A_l} v_a^s(k)$ ，因此模型只含有流入率变量。

5 求解算法

为了保证解的存在性，仿照 Lo 和 Szeto^[1] 假设流量在出行模式上的很小变化会使得其到达模式也发生很小的变化，从而实际路段出行阻抗 $\tau_a(k)$ 是 \mathbf{u} 的连续函数。由于不能保证 $\tau_a(k)$ 对 \mathbf{u} 的连续可微性，以及函数 $\Omega(\mathbf{u})$ 的严格单调性，我们采用 Solodov^[10] 的修正投影算法。该算法收敛性对函数 $\Omega(\mathbf{u})$ 特性要求较低，避免对 Lipschitz 连续性或者强制性的要求。考虑时段 $[0, T]$ ，按一定的小时段离散化成 K 个小时段，每个小时段记为 $k(1 \leq k \leq K)$ ，记 $\Omega(k)$ 和 $\mathbf{u}(k)$ 分别为 $\Omega_a^s(k)$ 和 $u_a^s(k)$ 的向量表示，算法具体如下：

步骤 1 初始化：给定任意初始点 $\mathbf{u}^0(k)(\forall k)$ ，正常数 α_{-1} 及正定对称矩阵 H ；选择参数 $\theta \in (0, 2)$ ， $\rho \in (0, 1)$ ， $\beta \in (0, 1)$ ；令 $i = 0$ 。

步骤 2 对任意时段求解未知变量 $\mathbf{u}^{i+1}(k)$ ，具体为：

步骤 2.1 $k = 0$ 。

步骤 2.2 利用到集合 Θ 上的以范数 $\|\cdot\|_P$ 为度量的最近点投影算子 $[\cdot]_P^+$ 来更新计算

$$\mathbf{u}^{i+1}(k) = [\mathbf{u}^i(k) - \gamma_i H^{-1}(\mathbf{u}^i(k) - \mathbf{z}^i(\alpha_i) - \alpha_i \Omega(\mathbf{u}^i) + \alpha_i \Omega(\mathbf{z}^i(\alpha_i)))]_P^+,$$

其中， α_i 为 $\alpha \in \{\alpha_{i-1}, \alpha_{i-1}\beta, \alpha_{i-1}\beta^2, \dots\}$ 中满足下式的最大值，

$$\alpha(\mathbf{u}^i(k) - \mathbf{z}^i(\alpha))^T (\Omega(\mathbf{u}^i) - \Omega(\mathbf{z}^i(\alpha))) \leq (1 - \rho) \|\mathbf{u}^i(k) - \mathbf{z}^i(\alpha)\|^2$$

$$\mathbf{z}^i(\alpha_i) = [\mathbf{u}^i(k) - \alpha_i \Omega(\mathbf{u}^i)]_P^+$$

$$\gamma_i = \theta \rho \left\| H^{-1/2}(\mathbf{u}^i(k) - \mathbf{z}^i(\alpha_i) - \alpha_i \Omega(\mathbf{u}^i) + \alpha_i \Omega(\mathbf{z}^i(\alpha_i))) \right\|^{-2} \left\| \mathbf{u}^i(k) - \mathbf{z}^i(\alpha_i) \right\|^2$$

步骤 2.3 若 $k = K$ ，转步骤 3；否则置 $k = k + 1$ ，转步骤 2.2。

步骤 3 收敛性检验：由于路段阻抗函数的特性复杂，采用下面的 Gap 函数作为收敛准则，以保证算法生成的解满足 DUO 条件^[3]。

$$RGap(k)^i = \frac{\sum_a \sum_s u_a^s(k) \cdot \Omega_a^{s^i}(k) - \sum_l \sum_s (\sum_{a \in A_l} v_a^s(k) + g_l^s(k)) \cdot \pi_l^{s^i}(k)}{\sum_l \sum_s (\sum_{a \in A_l} v_a^s(k) + g_l^s(k)) \cdot \pi_l^{s^i}(k)}$$

如果对于所有的时段 k 都满足 $RGap(k)^i < \varepsilon$ ，停止；否则，令 $i = i + 1$ ，转步骤 2。

6 数值算例

与 Lo 和 Szeto^[1] 相同，我们采用分叉路网及带有信号灯控制的 Nguyen 和 Dupius^[11] 网络来验证本文基于路段变量的模型及算法的正确性和优越性。

6.1 事故分叉网络

三条路段构成的分叉路网如图 5 所示。研究时段数设为 100，从 O 到 D1 和 D2 的交通需求分别为每单位时段出发车数为 4 和 2，每个小时段的长度为 10 秒。模拟时段开始的前 350 秒内保持这样的交通需求。在第 160 秒路段 2 上发生事故，持续了 130 秒后该事故得到解除。每个路段元胞数分别为 8、7、7，具体输入参数如下：堵塞密度：125 辆/千米；元胞承载能力分别为 16、12、12(辆/时段)；自由流和后向激波速度：48 千米/小时；流量能力：5 辆/时段/车道；车道数量：2。

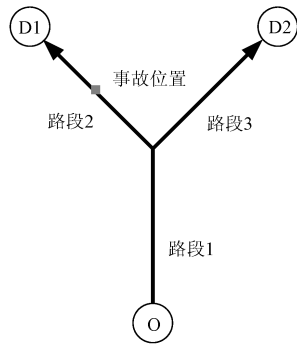
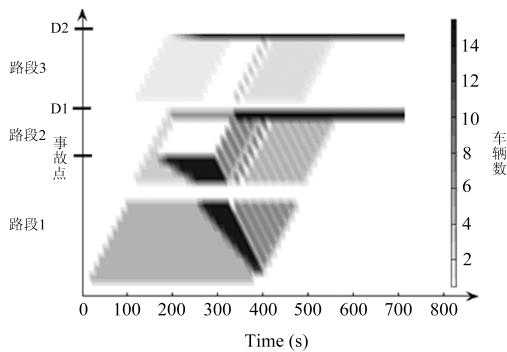


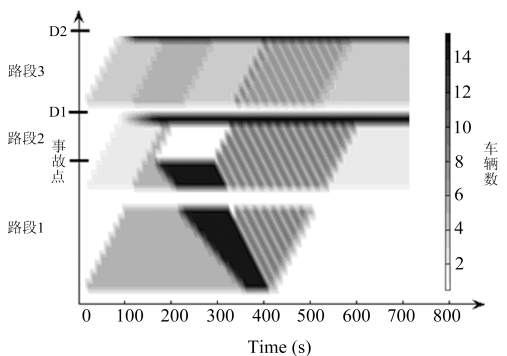
图 5 分叉路网

Fig. 5 Diverge network

图 6(a) 为随时空变化的车辆占有量的示意图. 阴影的深浅对应路段的车辆占有程度的大小. 另外, 本模型使用针对迄点的路段变量, 如果在分叉节点处分别有新产生的去往 D1 和 D2 的出行需求 2 和 4, 那么随时空变化的车辆占有量则如图 6(b) 所示.



(a)



(b)

图 6 (a) 分叉点无流量加载时的车辆占有量; (b) 分叉点有流量加载时的车辆占有量

Fig. 6 (a) No new demand generate; (b) New demand generate

从本例可知, 采用针对迄点的路段变量的 CTM 模型能够捕捉到多路段交叉的情况下交通流之间的相互影响, 并能反映诸如交叉口地段的排队的生成

和消散等细节的交通现象, 说明模型能够描述交通拥挤排队的实际物理现象, 避免了排队质点化与现实的不符.

6.2 带有信号灯控制的 Nguyen 和 Dupius 路网

如图 7 所示, 该路网由 13 个节点, 19 条路段组成及 6 个 OD 对构成. 表 1 给出了路段上的元胞划分, 表 2 为 OD 需求, 并只在研究的前 10 个小时段有交通需求, 表 3 给出了路网上信号灯位置与信号灯的固定时间设置, 其他参数与上例相同.

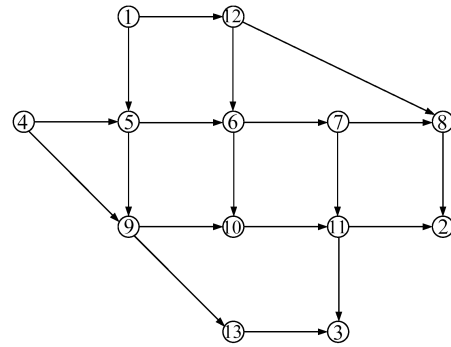


图 7 13 个节点的 Nguyen 和 Dupius 路网

Fig. 7 Nguyen and Dupius's 13-node network

表 1 路段元胞划分

Table 1 Number of cell on link

元胞数	3	4	5
路段	1→12 7→8 7→11 9→13 8→2 10→11	1→5 4→9 5→9 6→10 11→2 12→6	4→5 5→6 6→7 9→10 11→3 13→3
			12→8

表 2 OD 需求

Table 2 OD demand

		1—10 时段				
OD	1→2	1→3	4→2	4→3	6→2	6→3
需求	5	10	7.5	7.5	5	5

表 3 信号位置和固定时间设置

Table 3 Signal positions and their fixed time plans

信号设置路段	周期(时段)	绿灯时间(时段)	第一次绿灯时间(时段)
1→5	11	5	0
7→8	10	5	0
9→10	12	5	0
9→13	12	4	4
12→6	15	4	5

表 4(a) OD 1-2 和 1-3 的动态最优实际路径阻抗

Table 4(a) The optimal actual route travel time for OD (1,2) and (1,3)

时段	路径						
	1-12-8-2	1-5-9-13-3	1-5-6-7-11-3	1-5-6-10-11-3	1-5-9-10-11-3	1-12-6-7-11-3	1-12-6-10-11-3
1	11.33	—	—	—	—	22.00	22.08
2	11.00	—	25.43	25.45	—	—	—
3	11.00	—	25.50	25.50	—	—	—
4	11.00	—	27.02	27.04	—	—	—
5	11.33	—	—	—	—	—	27.63
6	11.00	27.34	—	—	—	—	—
7	11.00	27.02	27.02	27.02	27.02	27.02	27.02
8	11.26	26.02	26.09	26.10	26.02	26.02	26.02
9	11.57	25.37	—	—	—	25.35	25.36
10	11.72	24.37	—	—	—	—	—

(注: 没被列出的路径及符号“—”表示的路径没被使用.)

表 4(b) OD 4-2 和 4-3 的动态最优实际路径阻抗

Table 4(b) The optimal actual route travel time for OD (4,2) and (4,3)

时段	路径							
	4-9-10-11-2	4-5-6-7-8-2	4-5-6-7-11-2	4-5-6-10-11-2	4-9-13-3	4-9-10-11-3	4-5-6-7-11-3	4-5-6-10-11-3
1	18.96	—	—	—	19.14	—	—	—
2	18.90	—	—	—	18.26	—	—	—
3	18.99	—	—	—	18.00	—	—	—
4	18.65	—	—	—	17.59	—	—	—
5	—	18.00	—	—	17.65	—	—	—
6	17.73	—	—	—	17.19	17.19	—	—
7	—	19.53	—	—	—	—	20.73	20.73
8	—	—	22.08	22.01	21.93	—	22.00	21.93
9	22.57	—	22.57	22.57	22.20	—	—	—
10	21.86	—	—	—	22.29	—	—	—

(注: 没被列出的路径及符号“—”表示的路径没被使用.)

表 4(c) OD 6-2 和 6-3 的动态最优实际路径阻抗

Table 4(c) The optimal actual route travel time for OD (6,2) and (6,3)

时段	路径				
	6-7-11-2	6-7-8-2	6-10-11-2	6-10-11-3	6-7-11-3
1	11.00	—	11.00	11.00	11.00
2	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
3	—	10.00	—	11.00	11.00
4	—	10.00	—	11.00	11.00
5	—	10.00	—	11.00	11.00
6	—	10.00	—	11.00	11.00
7	—	10.00	—	11.00	11.00
8	11.56	—	11.56	12.01	12.01
9	11.67	—	—	11.92	11.86
10	11.82	—	—	—	11.48

(注: 没被列出的路径及符号“—”表示的路径没被使用.)

表 5 路段动态信息
Table 5 Dynamic information of link

路段	时段	流入率		流出率		路段流量	实际路段阻抗
		去往迄点 2	去往迄点 3	去往迄点 2	去往迄点 3		
1→12	1	5.00	10.00	0	0	0	3.33
	2	5.00	0	0	0	15.00	3.00
	3	5.00	0	0	0	20.00	3.00
	4	5.00	0	5.00	10.00	25.00	3.00
	5	5.00	10.00	5.00	0	15.00	3.33
	6	5.00	0	5.00	0	25.00	3.00
	7	5.00	1.39	5.00	0	25.00	3.00
	8	5.00	8.58	5.00	10.00	26.39	3.26
	9	5.00	10.00	5.00	0	24.97	3.57
	10	5.00	0	5.00	1.39	34.97	3.72
	11	0	0	5.00	8.58	33.58	3.00
	12	0	0	0	0	20.00	3.00
	13	0	0	5.00	10.00	20.00	3.00
	14	0	0	5.00	0	5.00	3.00
1→5	1	0	0.00	0	0	0.00	10.00
	2	0	10.00	0	0	0.00	9.00
	3	0	10.00	0	0	10.00	9.00
	4	0	10.00	0	0	20.00	9.00
	5	0	0.00	0	0	30.00	9.00
	6	0	10.00	0	0	30.00	8.00
	7	0	8.61	0	0	40.00	8.00
	8	0	1.42	0	0	48.61	7.13
	9	0	0	0	0	50.03	13.00
	10	0	10.00	0	0	50.03	12.00
	11	0	0	0	10.00	60.03	12.00
	12	0	0	0	10.00	50.03	11.00
	13	0	0	0	10.00	40.03	10.00
	14	0	0	0	10.00	30.03	9.00
	15	0	0	0	10.03	20.03	8.00
	16	0	0	0	0	10.00	7.00
	17	0	0	0	0	10.00	6.00
	18	0	0	0	0	10.00	5.00
19	0	0	0	0	10.00	4.00	
20	0	0	0	0	10.00	4.00	
21	0	0	0	0	10.00	4.00	
22	0	0	0	10.00	10.00	4.00	

变分不等式的具体求解算法中, 采用以二范数为度量的最近点投影算子, H 采用单位矩阵, 将 $\mathbf{h}(k)$ 到可行域上的投影转化为求解下列二次规划问题

$$\begin{aligned} \min z(\mathbf{u}(k)) &= \frac{1}{2} \sum_s \sum_a [u_a^s(k) - h_a^s(k)]^2, \quad \forall k \\ \text{s.t.} \quad \sum_{a \in B_l} u_a^s(k) &= \sum_{a \in A_l} v_a^s(k) + g_l^s(k), \quad \forall l \neq s, \forall s, \forall k \end{aligned} \quad (10)$$

$$u_a^s(k) \geq 0, \quad \forall a \in B_l, \forall s, \forall k \quad (11)$$

与模拟路径相同, CTM 模型能够准确描述路段上车流的一些动态特性, 详见 Lo 和 Szeto^[1], 此处不作赘述, 只详细阐述本文模型的实用性和优越性. 表 4(a) ~ (c)(见上页) 给出该模型的配流结果, 描述了不同 OD 对之间时变的最优路径阻抗, 可以看到被使用的路径拥有最小路径阻抗, 而没被使用的路径则具有相同的或者更大的出行阻抗. 并且, 在满足理想 DUO 条件进行的路径选择过程中, 每个 OD 对

之间被使用的路径是随着时间而变化的, 因此模型能够在保证 FIFO 条件下根据理想的 DUO 条件分配交通流。

Lo 和 Szeto^[1] 所给模型是基于路径变量构造的, 但是它只给出已知 OD 上的路径信息, 关于路径所包含的路段详细车辆信息却不易获取。相比之下, 本文模型能够为出行者提供在任意决策节点处当时交通条件下到达讫点的最短路径, 在每一个小时段都能为出行者提供整个路网上所有路段上针对各个迄点的车流信息, 如: 去往不同迄点的流入率、流出率及路段流量, 路段阻抗等, 从而对出行者进行实时诱导, 为 ATIS 提供全面的出行诱导信息。例如表 5 描述了模型解提供的信息 (由于本例路段较多, 此处只列举了与新生成流量节点相关联的路段 1→12 及 1→5 的信息)。

7 结论

本文模型将道路交通流宏观模型与动态网络交通配流问题得到较好的结合, 但其仍为初步的工作, 探讨路段阻抗函数的特性以及寻求更加有效准确的路段阻抗估计方法是我们需要进一步研究的工作。

References

- 1 Lo H K, Szeto W Y. A cell-based variational inequality formulation of the dynamic user optimal assignment problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, **36**(5): 421~443
- 2 Szeto W Y, Lo H K. A cell-based simulation route and departure time choice model with elastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, **38**(7): 593~612
- 3 Florian M, Mahut M, Tremblay N. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. In: Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2002. 439~444
- 4 Daganzo C F. The cell transmission model: a simple dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1994, **28**(4): 269~287
- 5 Lighthill M H, Whitham G B. On kinematics wave: II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1955, **229**(1178): 317~345
- 6 Richards P I. Shock waves on the highway. *Operational Research*, 1956, **4**: 42~51
- 7 Daganzo C F. The cell transmission model part II: network traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995, **29**(2): 79~93
- 8 Ran B, Boyce D E. *Modeling Dynamic Transportation Network: An Intelligent Transportation System Oriented Approach*. Berlin: Springer, 1996

- 9 Gao Zi-You, Ren Hua-Ling. *Dynamic Assignment Problems in Urban Transportation Networks: Models and Methods*. Beijing: China Communications Press, 2005. 147~169 (高自友, 任华玲. 城市动态交通流分配模型与算法. 北京: 人民交通出版社, 2005. 147~169)
- 10 Solodov M, Tseng P. Modified projection-type methods for monotone variational inequalities. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1996, **34**(5): 1814~1830
- 11 Nguyen S, Dupuis C. An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs. *Transportation Science*, 1984, **18**: 185~202



连爱萍 北京交通大学系统分析与集成专业博士研究生。主要研究方向为交通系统理论、交通规划与管理及智能交通系统。本文通信作者。

E-mail: aiplian@sohu.com

(LIAN Ai-Ping Ph.D. candidate in systems analysis and integration, Beijing Jiaotong University. Her research

interest covers transportation systems theory, planning and management of traffic and transportation, and intelligent transportation systems. Corresponding author of this paper.)



高自友 北京交通大学教授。主要研究方向为运筹学与控制论、交通流模型及理论、城市交通网络设计和交通网络复杂性。

E-mail: gaoziyou@jtys.bjtu.edu.cn

(GAO Zi-You Professor at Beijing Jiaotong University. His research interest covers operational research and

cybernetics, modeling and analyzing of traffic flow, urban traffic network design problems, and complexity of transportation networks.)



龙建成 北京交通大学交通运输规划与管理专业博士研究生。主要研究方向为交通系统理论、交通流模拟、交通规划与管理及智能交通系统。

E-mail: 04114182@mail.bjtu.edu.cn

(LONG Jian-Cheng Ph.D. candidate in planning and management of traffic and transportation, Beijing Jiao-

tong University. His research interest covers transportation systems theory, traffic flow simulation, planning and management of traffic and transportation, and intelligent transportation systems.)